

光纤白光干涉技术的回顾与展望

苑立波

(哈尔滨工程大学理学院光子科学与技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 光纤白光干涉技术与方法是光纤技术领域独具特色的一种测量方法和传感技术,是光纤技术多领域交叉应用中较为有代表性的一个分支。该项技术在宽谱光干涉特性研究、绝对形变光纤传感测量、光波导器件的结构及其对光波反射特性参量的检测、光纤陀螺环中光偏振态横向耦合测量与评估以及医学临床诊断的组织结构形态的光学层析技术等方面,都具有广泛的应用。对光纤白光干涉技术的发展给出了一个概略性的描述。从市场需求与技术本身发展规律的视角出发,分析了该技术发展的动力基础。最后,给出了对于该项技术及其发展趋势的描绘和展望。

关键词 光纤;白光干涉;低相干;传感器;光学层析成像

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0900137

Overview and Forecast of Fiber Optic White-Light Interferometry

Yuan Libo

(Photonics Research Center, School of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Fiber optic white-light interferometry is one of the unique measurement and sensing technology in the fiber optic research field. It is one of typical achievement application branches of fiber optic multidisciplinary research, such as broad-band light coherence characteristics, high precision deformation absolute measurement, waveguides components structures and reflectivity properties testing, cross-coupling between polarization states evaluation for fiber optic gyro, as well as low-coherence tomography technology for tissue and clinical diagnosis in medicine. A brief description about the white-light interferometry and its development in the past several tens years is given. From the view of demands of market and the intrinsic rules of the technology development, the driving dynamics mechanisms of the technique is analyzed. Finally, the developing trend and forecast of this technology is pointed out.

Key words optical fiber; white-light interferometer; low coherence; sensor; optical tomography

OCIS codes 060.2310; 120.3180; 060.2370; 030.1640

1 引 言

光纤白光干涉原理与技术的发展既取决于基础理论上的深刻认识,又受益于技术上重大进步的启迪,在社会发展需求的牵引下,历经了几十年的研究与积淀,在传感技术、计量与测量学、生物学和医学与临床应用等领域取得了较大的进步,获得了广泛的应用。在该技术发展过程中,以下是具有里程碑意义的事件。

1955年,E. Wolf 和 Blanc-Lapierre 分别独立建立了部分相干光理论,引进了关联函数^[1,2];对关联函数的深入认识与系统研究,奠定了白光干涉的理论基础。

1983年,Brian Culshaw 课题组^[3]首次报道了基于白光干涉原理在光纤传感中的应用;开启了光纤白光干涉传感技术的研究方向。

1986年,K. Takada 等^[4]提出了采用SLD宽谱

收稿日期: 2011-07-12; **收到修改稿日期**: 2011-08-02

基金项目: 国家 973 计划(2010CB334701)和国家自然科学基金(60927008,60877046,61077062)资助课题。

作者简介: 苑立波(1962—),男,博士,教授,主要从事特种光纤制备、纤维集成光学以及光纤传感技术及其应用等方面的研究。E-mail: lbyuan@vip.sina.com(中国光学学会会员号:S040421085S)

偏振光源来测量沿保偏光纤传输的光的横向耦合特性的方法,奠定了光学相干域偏振计(OCDP)技术的研究基础。

1987年,Youngquist等^[5]展示了一种光学相干域反射计的评估新技术,后来被简称为光学低相干反射计(OLCR)。

1991年,Huang等^[6]首次展示了基于白光干涉的二维层析成像方法;成为光学相干层析成像术(OCT)技术的研究开端。

2003年,发展了频域光学相干层析成像术(FD-OCT)技术,该技术与之前的时域OCT技术相比,同时解决了测量灵敏度与扫描测量速度的问题^[7~12]。

2003年,E. Wolf^[13]对部分偏振光的相干特性进行分析时,指出了干涉的基本作用。基于这种考虑,他构造了一种相干与偏振的统一理论,这预言了随机光波电场的大量未知特性。

2005年,P. Réfrégier等^[14]提出了一种测量相干特性具有的一般不变性的新方法,称为内禀相干不变性理论;深化并拓展白光干涉理论的内涵,被用于解决信号处理过程中偏振衰退的问题,进一步导致了光纤白光干涉偏振传感解调新技术的发展。

2 白光干涉理论及其发展

白光干涉理论基础主要源于光的部分相干理论^[1,2],这在Born与Wolf所著的《光学原理》(1999年的第7版)中有较为详细的阐述^[15]。由于普遍的相关函数的引入,使得介于完全相干和完全不相干光的两个极端情况之间的空白地带得以进行充分的研究。这为“白光”——宽谱光源的干涉及其应用奠定了理论基础。之后发现,Wolf所引入的关联函数服从两个波动方程:不仅光波扰动本身以波动的形式传播,而且其关联也以波动的方式进行传播。这导致了Wolf后来又进一步发展了部分相干光的光谱相干规律及其光谱相干的传播理论。

在光纤白光干涉理论的讨论中,与空间中光波传播的情况不同,光波在光纤中传输时其偏振态易于受到影响,因此光的偏振问题就显得格外重要。尽管偏振光学中极少严格讨论部分相干光的偏振态的问题,尤其是部分偏振光的问题。但是传统的偏振光的概念及其对光的偏振分析方法仍然可以用于讨论部分相干光的部分偏振性质。2003年E. Wolf^[13]对部分偏振光的相干特性进行分析时,他指出了干涉的基本作用。因此他构造了一种相干与偏

振的统一理论,这预言了随机光波电场的大量未知特性。事实上,部分偏振光及部分相干光的理论只有近来才受到人们的关注。E. Wolf发展的理论对相干分析做出了新贡献并开启了迷人的光学领域的新问题,即在干涉实验中,是否必须使光偏振才能获得最大的相干度。

2005年,P. Réfrégier等^[14]为了回答上述问题,提出了一种测量相干特性具有的一般不变性的新方法,给出了部分偏振光的内禀相干不变度的概念并建立了内禀相干不变性理论。该理论指出,两光波电场之间的内禀相干度与每一个光波电场的偏振度紧密相关,偏振度描写的是每个光波电场自身的统计相关的有序程度,而内禀相干度则是指两光波电场之间的统计相关的有序程度。因为两者所描述的对象是不同的,因此两者不仅能通过内禀相干度的新概念得以分开,而且两者具有不同的物理意义。内禀相关理论表明部分偏振光的相干分析可分解为具有不同不变特性的四个参数的分析。偏振度与每个电场分量自身间的随机性相关而内禀相干度表征的是矢量电场之间的随机性。正是在内禀相干不变性理论的基础上,发展了光纤中部分偏振相干的偏振补偿测量方法,并将其进一步应用于远程白光干涉偏振扫描的传感解调系统中。

3 光纤白光干涉技术发展历程

光纤白光干涉技术上的发展,大致上从以下三个方面进行概括性的阐述,包括:光纤白光干涉传感技术,光纤白光干涉测量技术和基于白光干涉的OCT技术。

3.1 光纤白光干涉传感技术

白光干涉测量(有时称为低相干测量方法)在经典光学中已有详尽阐述^[15]。它使用低相干、宽谱光源,例如半导体激光器(LD)或发光二极管(LED)作为光源。所以这种传感方法通常被称为“白光”干涉测量方法。同所有的干涉原理一样,光程的改变可以通过观测干涉条纹来进行分析。

尽管早在1975年就提出了相干原理^[16],并于1976年在光纤通信领域中实现了可能的传输方案^[17],但其在光纤传感技术中的应用却是由Brian Culshaw的研究小组^[3]首次报道于1983年。第一个完整的基于白光干涉技术的位移传感系统是在1984年报道的^[18]。此成果显示出白光干涉测量技术可以应用于任何可以转换成绝对位移的物理量的测量,并且具有很高的测量精度。1985~1989年期

间,基于白光干涉原理的传感器被广泛应用于对压力^[19~21]、温度^[22~25]和应变^[26,27]测量的研究中。通过一系列研究和技术改进,例如发展了光强度噪声衰减技术^[28]、扫描范围扩展延迟技术^[5]和测量范围扩展技术^[29],使得白光干涉测量技术的研究内涵和应用范围得以迅速发展。

利用低相干技术的光纤传感器,其最基本的结构如图1所示。相对于传感干涉仪,串接的第二个问讯干涉仪对于获得干涉条纹的信息来说是必需的。这个串接的结构将取决于处理干涉信号的方法,选用分光计还是第二干涉仪的结构,要取决于频谱分析还是相位分析。

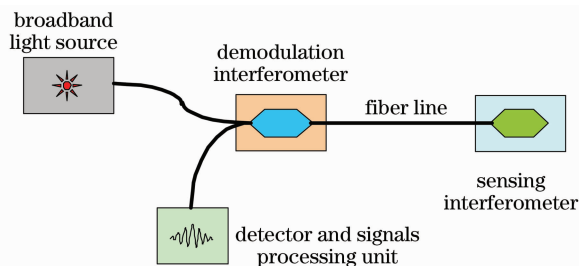


图1 基于白光干涉式光纤传感系统的基本构成

Fig.1 Basic configuration of white light interferometric fiber optic sensing system

自1990年以来,光纤白光测量技术持续发展,为绝对测量提供了更多的解决方案,而这些都是采用高性能相干光源的传统光纤干涉仪所无法替代的。近十余年来,在信号处理、传感器设计、传感器研制和传感器多路复用等方面,白光干涉测量技术得到了较大的发展。在信号处理方面,一些新方案的提出,提高了光纤白光干涉仪的性能。发展了高速机械扫描技术,扫描速度从21 m/s逐步提高到了176 m/s^[30~32]。电子扫描技术相对于机械扫描方法的优点是更紧凑,精密与快捷,并且避免了使用任何移动装置^[33~37]。光源合成方法是对光纤传感器信号处理的一大改进,显著提高了识别和确定干涉传递函数中心条纹位置的能力^[38,39]。在此之后,其他研究人员的工作,又进一步发展了这项技术^[40,41]。另一种改进对中心条纹识别精度的方法是使用多阶平方(multi-stage squaring)信号处理方案^[42]。

光纤白光干涉仪的另外一个优点就是可以很容易地实现多路复用。多个传感器在各自的相干长度内,只存在单一的光干涉信号,因而无需更复杂的时间或者频率复用技术对信号进行处理。20世纪最后10年的研究工作,主要集中在发展多路复用传感器结构,以适应应用领域对传感器数量与容量的需

求。这些典型的白光干涉多路复用方案使用了分立的参考干涉仪,并进行时间延时,以匹配遥测传感干涉仪。传感干涉仪是完全无源的,而且用于解调的复用干涉信号对连接光纤中的任何相位或长度改变不敏感。在分布式传感器^[43]概念的基础上,为了构成准分布式光纤白光干涉测量系统,研究者进行了许多探索和尝试。Gsmseroli等^[44]发展了低相干多路复用准分布单线路偏振传感系统,用于结构监测;Lecot等^[45]报道的实验系统中包含超过100个多路复用的温度传感器,用于核电站交流发电机定子发热量的监测;Rao等^[46]建立的通用系统是基于空间多路复用,最大可以连接32个传感器;Sorin等^[47]提出了一种新型的基于迈克耳孙干涉仪和自相关器的干涉多路复用传感阵列方案;由Inaudi等^[48]建立了一种并行多路复用方案;此外,基于简单的光纤迈克耳孙干涉仪,分别使用光纤开关和 $1 \times N$ 星型耦合器的串行和并行多路复用技术分别报道于文献^[49,50]。近来,文献^[51]又提出了一种光纤环型谐振腔方案。使用环型谐振腔的目的是取代文献^[49]中价格昂贵的光纤开关。它的优点是大大减小了多路复用传感阵列的复杂性和成本。

随着光纤白光干涉传感技术的不断发展,该技术日趋完善,同时也发展了越来越多的应用。Inaudi等^[52]发展了低相干大尺度光纤结构传感器,在瑞士工业建筑业中被广泛使用,获得了几个微应变(10^{-6})的分辨率,其测量范围超过几千个微应变(10^{-6})。通过采用与通道截取光谱法相似的信号处理方法,绝对外部应力传感系统展示了低于 1×10^{-4} 的轴向应变分辨率^[53]。文献^[54~56]报道了基于白光干涉技术的光纤引伸计用于监测混凝土试样内部的温度和测量一维、二维应变。可以预期,这种基于白光干涉技术的绝对应变传感器将在智能结构和材料中起到越来越重要的作用^[57]。

与国外开展的光纤白光干涉技术研究相比,国内的研究起步稍晚。早期研究集中在光纤白光干涉仪构建和白光干涉原理在器件测量的应用方面,如上海大学的张靖华等^[58,59]分别开展了利用白光干涉原理实现保偏光纤测量与连接对轴以及光源功率谱对白光干涉测量的影响的研究;华中科技大学王奇等^[60]于1993年报道了一种用多模光纤连接的双法布里-珀罗(F-P)干涉仪传感系统,可用于温度和压力的测量;李雪松等^[61]于1996年报道了一种白光干涉型迈克耳孙光纤扫描干涉仪,可在 $150 \mu\text{m}$ 的测量范围内,实现测量不确定度为 $1.5 \mu\text{m}$ 的测

量;浙江大学周柯江课题组^[62,63]于1997年报道了利用白光干涉技术用于偏振模式分布的测量;上海交通大学张美敦课题组^[64,65]报道了光纤干涉仪的臂长差和基于白光光纤干涉仪的折射率测量方法。

近年来,在传感与测量研究方面,国内的研究人员广泛地关注将白光干涉原理与光纤技术相结合的研究,发展了多种新型结构的光纤白光干涉仪、白光干涉信号解调方法、白光光纤传感器以及应用,实现各种物理量诸如:位移^[66]、温度与应变^[67]、压力^[68]和折射率等的测量传感器及其应用的研究。上述研究主要集中在高等院校中,例如:天津大学的张以谟等^[69]开展了数字化白光干涉扫描仪及其信号处理^[70]和包络提取^[71]、保偏光纤分布式传感^[72,73]以及基于白光干涉原理的光学相干层析技术^[74,75]等诸多方面的研究;电子科技大学饶云江等^[76]和大连理工大学于清旭课题组^[77,78]分别发展了基于非本征 F-P 腔的光纤白光传感器及其智能结构的应用;北京理工大学江毅等^[79~81]发展的傅里叶变换波长扫描的白光光纤 F-P 传感器及其信号解调方法;电子科技大学周晓军等^[82,83]发展的基于白光干涉原理和保偏光纤的分布式传感器。哈尔滨工程大学则专注于光纤白光干涉传感技术的研究,发展了光纤白光干涉的理论分析方法,构造了多种新型结构的白光光纤干涉仪^[84],拓展了准分布线阵、矩阵和环形网络光纤传感器网络拓扑结构^[85~88],并发展了一系列对于混凝土内部进行应力应变测量的方法^[89,90]。

3.2 光纤白光干涉测量技术

光学白光干涉测量技术是一种非接触无损光学测量技术,适合于对光波透明或可穿透的材料或者器件进行评估与测量。该技术起源于光纤通信工业,为了检测光波导器件或光纤中的缺陷,发展了光学低相干后向反射计(OLCR)^[5]。OLCR 技术的发展得益于许多器件的发展,如宽带半导体光源、单模光纤以及光纤耦合器等。该技术用于测量光学波导装置尺寸和小型光学元件中的缺陷评估中,其典型的分辨率在数十个微米^[91~93]。OLCR 技术的快速、精确及无损伤测量等一系列优势,使得该技术成为一个十分活跃的研究领域。

在解决高精度光纤陀螺技术过程中,人们需要发展一种能够评估光纤陀螺系统中各个元件的特性参量,以便确定各个相关参量之间的关系,从而提高系统的综合性能。特别是保偏光纤环这一关键单元在绕制过程中以及绕制后保偏特性的变化对陀螺性

能将产生较大的影响,因此进一步发展了 OCDP 技术^[4],用于正交偏振模的横向耦合相关分析,目的是解决光纤陀螺环中绕环技术的评估与检验。OCDP 技术是光纤白光干涉技术中的透射式测量技术,该技术目前已经成为高精度光纤陀螺光学元器件检测与评估的重要方法之一。

3.3 基于白光干涉的 OCT 技术

在许多方面,由于使用安全且成本低廉,光学技术在医学中扮演了很重要的角色。在过去的 15 年中,迅速发展的低相干计量学(LCI)以及光学层析技术(OCT)为医学领域提供了先进的研究与诊断方法^[6,94~95]。OCT 技术引领了宽谱光源的短距离瞬态相干技术,由可以深至组织内部 2 mm 的后向散射信号,可获得组织深部的高分辨率微结构图像,这种方法完全是非侵入的。OCT 技术作为一种生物组织微结构图像的获取工具在医学临床诊断中具有潜在的应用价值,并逐渐获得了广泛的应用^[96~105]。在过去的 10 年中,OCT 技术快速发展并取得显著的成就。与此同时,纳米技术也取得了快速的进步并在医学领域中开创了被称为“纳米医学”的新兴领域。尽管纳米医学尚处于其发展的初期,但在未来的 10 年里该研究方向极具发展潜力。而低相干测量技术将被证明是一种关键的成像工具,必将在纳米医学中获得广泛的应用。

3.3.1 OCT 技术的起源与演进

OCT 技术的发展可上溯至 20 世纪 80 年代^[5,106~109],Fercher 等^[110]和 Fujimoto 等^[111]将该技术引入眼科学。在 20 世纪 80 年代末期,他们采用一维光程扫描技术测量了眼睛内部各部分组织尺寸。Huang 等^[6]在 1991 年进一步扩展了该技术,使其可以进行二维层析成像,这就是今天众所周知的 OCT。首次体内视网膜成像是在 1993 年由 Fercher 等^[112]和 Swanson 等^[113]分别独立获得的。此后,OCT 技术开展了大量的研究,并被广泛应用于医学成像的研究中。随后,发展了宽带激光光源、高灵敏度高速成像技术、与标准医学导管和内窥镜相结合,发展了先进的 OCT 集成探头。这些技术又进一步推动了各种 OCT 功能的深化与发展,如:多普勒 OCT 技术、偏振敏感 OCT 技术(PS-OCT)、光谱 OCT 技术以及二阶谐波 OCT 技术^[114~125]。OCT 研究领域中所取得的主要的突破之一是 2003 年发展的频域 OCT(FD-OCT)系统,理论和实验结果都表明与时域 OCT(TD-OCT)系统相比,在灵敏度上具有明显的优势^[126~131]。在过去的几年中,频

域 OCT 技术不断进步与成熟,随着高速图像采集技术的发展,该技术已经开始用于临床,并能快速采集组织样本数据从而避免病人移动对诊断图像的影响^[132~136]。

3.3.2 在医学中的应用

迄今为止,OCT 在医学临床中最富有成效的应用是在眼科学领域。现今已经建立了 OCT 视网膜与青光眼疾病的标准模型用于临床诊断^[96,97,112,137~140]。目前,全世界已经有十几家公司可以提供商用化眼科 OCT 诊断设备。

心脏学是 OCT 技术应用的另一个在临床上较有影响力的应用领域。血管内 OCT 技术对于动脉内壁斑的形态表征以及诸如安放支架等介入治疗的可视化方面已经取得多方面的进展^[141~149]。血管内 OCT 技术已经从实验阶段进入临床使用阶段。

肿瘤学是 OCT 技术得以发挥其重要作用的另一个应用领域。在该领域中 OCT 技术可以用来确定肿瘤边界、肿瘤图像导引手术。OCT 技术还可以用于早起癌症检测,因为在癌症的早期所导致的组织微小损伤很难被发现,而 OCT 的高分辨率可以及早观察到这些组织的微小变化^[105,150~153]。事实上,OCT 技术作为一种有效的成像技术可以广泛的用于生物、医学以及小动物研究领域中^[136,154~160]。

3.3.3 在纳米医学中的应用

纳米医学是最近由于纳米技术应用于医学而迅速发展起来的一个新兴领域,这一新兴领域应用了过去 10 年纳米技术所取得的大量研究成果与技术成就^[161~169]。纳米医学是一个高度交叉的新兴学科,关联学科包括生物学、化学、物理、机械工程、材料科学以及临床医学。其关注的研究与应用,从探测到分子水平变化的早期疾病诊断,到新的亚细胞或者分子水平的治疗,这种治疗要用到药物靶的纳米输送平台。而未来的纳米医学还要开展亚细胞修复的研究^[162,170~175]。

基于低相干干涉测量学的 OCT 技术对于纳米医学具有巨大的潜在应用价值。尽管对于组织的穿透深度的限制是一个较大的挑战,但是对于 OCT 技术而言,与超声或者磁共振成像(MRI)技术相比,其所能提供的超高分辨率对于临床诊断应用仍具有广阔的发展前景。由于激光光源所取得的进步,使得超高分辨率 OCT 能够实现亚微米的分辨率,类似于相干合成孔径显微镜(ISAM),该技术的出色表现在横向分辨率和纵向聚焦深度的扩展两个方面,这使得亚细胞成像成为可能^[176~180]。这种超高

分辨率 OCT 技术能够帮助人们进行组织发病机制的早期诊断,也能帮助复查处理后组织的变异情况。

OCT 技术的若干功能上的扩展为当下和未来纳米医学的研究提供了强大的工具。谱域相位显微镜(SDPM)是谱域 OCT 的功能扩展,被用于研究细胞组织内部动力学,通过它可以监测活体细胞内部组织的纳米量级的运动以及细胞质的流动^[181~184]。SDPM 具有亚纳米级深度分辨的高灵敏度,它能够通过相位的变化探测到由于细胞的动力学所导致的折射率和厚度的变化。谱显微 OCT 能被用于 OCT 图像对比增强,这些图像对于分子内生的或是外生的造影剂都十分重要,如:近红外染料、等离子共振金纳米粒子等^[119,124,185~189]。偏振敏感 OCT (PS-OCT)是 OCT 技术的另一种扩展,它通过探测组织内在的由于肌肉中的胶原或结缔组织引起的光学双折射的差别,能够提高图像的对比度,并能获得更丰富的组织结构的信息^[114,116]。通过探测肌肉组织的双折射光信号的变化,PS-OCT 能够获得肌肉的超结构变化的情况^[190]。磁力作用的 OCT 能够探测到组织中磁离子氧化物的纳米粒子,因此能够获得吸附在磁纳米粒子上抗体或蛋白质的示踪目标的运输信息^[121,122]。非线性干涉振动图像(NIVI)是一种相干反斯托克斯拉曼散射测量(CARS)技术,它具有干涉的深度图像分解能力,正在发展成为基于低相干技术的分子内禀特征对比图像技术^[191]。尽管这些技术在纳米医学中具有巨大的潜在应用价值,但是在它们广泛应用于纳米医学领域之前,仪器科学的突破与进步仍然是十分急需和迫切的。

4 发展动力

在光纤白光干涉技术的发展与应用过程中,与其他任何一项科学技术的发展相类似,是在各种各样的动力驱动下不断向前发展的。在技术发展的初期,其主要动力来自于人类与生俱来的好奇心驱使的探求原动力以及可能的未来应用需求的牵引;在技术发展的中期,其主要动力来源于技术本身的推动以及人们对于技术完善性的追求与努力;在技术发展的逐渐成熟期,这一时期市场需求的拉动处于主导地位,日益明晰的产品需求不断加快了技术的完善程度。

事实上,促进光纤白光干涉技术发展的主要动力有两个:1)需求的拉动;2)技术发展的推动。一方面,所有这些应用的前景及其可能的社会需求牵引着具有洞察力的研究者不畏艰难,跋涉前行。另一

方面,研究者对于该领域认识的不断深入,导致了技术的深化和进步,这反过来,又进一步推动了白光干涉技术在应用中的深入发展。这两种动力所产生的合力共同驱动着光纤白光干涉技术的发展与进步。

4.1 需求牵引的拉动

就市场需求的牵引与拉动而言,在光通信应用领域,各种有源与无源光纤器件、集成光学器件的评估与质量检测的需求导致了 OLCR 技术的发展,为此 HP 公司开发了光纤白光干涉测量系统;在光纤传感技术领域,高精度光纤陀螺发展的需求,人们希望能够对陀螺绕环的性能和质量进行评估,以便评价保偏光纤陀螺环中的横向偏振耦合对陀螺性能的影响,进而导致了 OCDP 技术的发展;大型土木建筑结构智能监测、周界安全警戒、火灾预警等应用需求,引导了人们在光纤白光干涉基本原理的基础上,开展了大量的应用研究,导致了若干公司对光纤白光干涉产品的开发与推广,如瑞士的 Smartech 公司开发了典型的光纤白光应用系统(SOFO)^[192],并在瑞士以及欧洲进行了大量的建筑工程健康监测的应用;弗吉尼亚理工大学王安波研究小组开拓了恶劣工业环境下 F-P 腔型的复合传感技术研究,促进了光纤白光干涉技术在石油工业领域的应用。美国的 RockTech 公司开发了具有温度补偿的 F-P 腔型光纤白光干涉应变传感器,可用于各种土木工程的形变监测。在白光干涉原理应用的技术发展动力分析过程中,医学临床诊断的需求成为 OCT 技术发展的巨大牵引,它强有力地拉动了 OCT 技术多个方面的发展,无论是在研究人员的数量上还是产品开发资金投入上都是最具规模的,使得该项技术的快速发展,并进入临床使用中。同时也使得各种新型 OCT 技术的发展不断得到深化。

4.2 技术发展的推动

就技术发展的推动来说,主要来源于技术创新的突破性推动与技术完善的渐近积累性推动这两个方面。例如,自从 1983 Brian Culshaw 的研究小组首次将白光干涉原理引入光纤传感技术领域,使得人们对于该技术的认识不断深入,K. T. V. Grattan 的研究组在光纤白光干涉特性方面开展了系统的研究,Ken 的研究组搭建了光纤白光干涉多路复用系统,在实际工程应用方面,Smartech 的创始人 Inaudi 采用了具有温度补偿的传感器,推动了 SOFO 系统在工程上的应用;HP 公司不仅发展了 OLCR 仪器系统,而且其研发人员在光纤传感远程匹配多路复用技术方面也做出了贡献(Sorin 和

Baney,1995)。一个基于对光学偏振与光的内禀相干不变性的认识的深化所导致的技术推动的例子是由光的偏振态与内禀相干性之间的密切关系引发的。近几年来,由于认识到光场具有内禀相干不变性,由此发展了光纤白光干涉的偏振匹配扫描技术,不仅能够改善准分布光纤传感的信号质量,实现偏振衰落恢复,而且可以进一步实现偏振态的动态传感,并发展了偏振扫描传感解调方法。此外,为了使得光纤白光干涉传感技术能够形成传感网络,提高传感系统抗破坏能力,本课题组还发展了双端问询环形网络传感技术^[193~197],并进一步改进了远程匹配的共光路系统^[198~205]。OCT 技术的发展中技术的突破与累计渐近对整体技术进步的推动作用也十分明显,自从 1991 年发明了 OCT 技术以来,由于其潜在的医学应用背景,一直成为白光干涉技术领域发展最快的一个分支。在 OCT 技术发展过程中,随着巨大的市场需求的拉动,加速了其实用化进程,应用性研究不断完善了各个方面的技术缺陷。2003 年 FD-OCT 在技术上取得了突破性进展,同时解决了 TD-OCT 系统在扫描速度和探测灵敏度两方面的技术瓶颈,推动了 OCT 技术的快速发展并形成了各种成熟的临床应用医疗诊断设备。

5 趋势与展望

5.1 目前的研究进展与现状

借助于文献计量学所给出的统计结果来间接地给出本领域发展现状的一个描述。图 2 是基于 SCI 数据库和 EI 数据库所进行的论文发表数量上的统计结果,选用了下面几个主要关键词,白光、低相干、干涉计量和光纤。采用的检索策略为:(White light)or (Low coherence) and (Interferometry) and (Optical fiber)。假设被 SCI 收录的数据库偏重于学术研究的论文,而 EI 收录的数据库偏重于技术研究的论文,所获得的历年该领域发表的学术论文与技术论文的大致数量的统计结果如图 2 所示。图 2 中给出的数据截止到 2010 年为止,依据上述两个数据库的检索结果,该领域在全世界所发表的主要文献量按年度的统计直方图分别由两种不同灰度的图标给出。该统计结果一方面由于受数据库所收录的文献的限制,不可能将所有相关的研究都包含进来;另一方面,由于 SCI 和 EI 的数据库所收录的文献有部分重叠,加上很难严格区分科学论文与技术论文,因此该结果只是一个大致的描述。

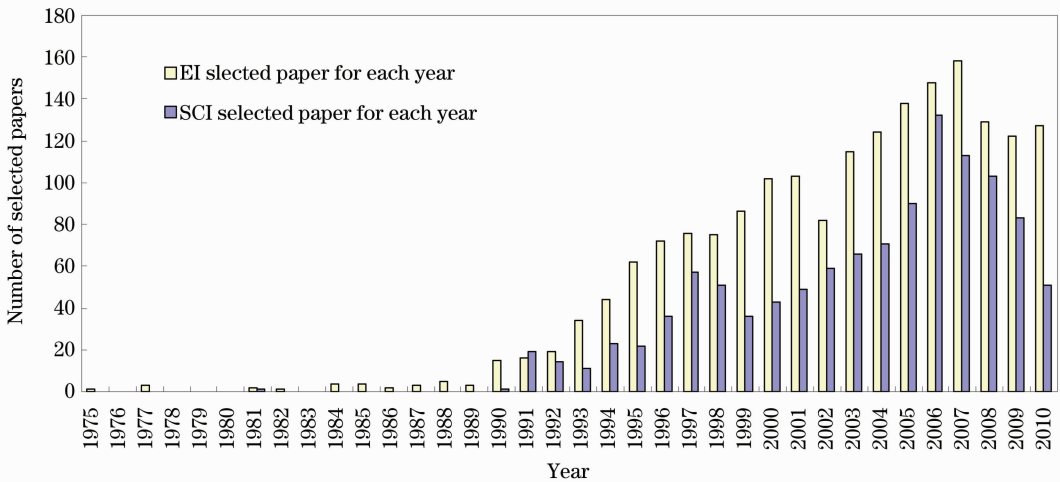


图2 来自 SCI 数据库, EI 数据库关于白光干涉理论与技术方面的科学研究论文统计直方图

Fig. 2 Statistical histogram of published papers related with fiber optic white light interferometry, the data come from the database of SCI and EI

由图2可见该学术研究领域发展的各个不同阶段的情况。可以将其大致分为三个阶段:学术发展初期、学术发展高速增长期和学术发展成熟期。在该领域发展的初期,受限于对理论知识认识 and 理解的充分程度和对各项关键技术认识的深度及其元器件发展不完善的影响,从事研究的人员和研究论文发表的数量都很有有限,这种状况一直持续到1990年。该领域的研究随后进入到学术发展的高速增长期,在这一时期,由于多方面的逐渐积累,在理论方面的认识与研究日渐深入,技术方面,若干关键技术瓶颈逐渐得到克服和解决,同时各种重要的元器件的性能和品质也得到进一步的改善和提高,从而推动该技术研究领域迅速繁荣和发展,年发表论文数达到2006年的顶峰。之后该技术领域进入其学术发展的相对成熟期,表现在各项技术的进一步完善和该技术在应用领域的横向交叉与拓展。这个时期也是产品开发与应用的黄金时期,因为技术风险已经逐渐消除,关键器件的价格壁垒也日渐降低,学术引领的作用初步完成而过渡到技术引领和产品开发与完善阶段。

5.2 技术发展预测与展望

根据上述 SCI, EI 学术论文发表趋势直方图可以看到,当一个新兴的学术研究领域快速增长成为一个研究热点的时候,其学术论文的发表量就会以指数的形式快速递增。而当各个方面的关键技术都获得突破时,则表现为学术研究上的趋于成熟和技术方面趋于完善。这将伴随产品的开发与应用性的研究结果突显。这种状况可以大致用图3加以描绘。

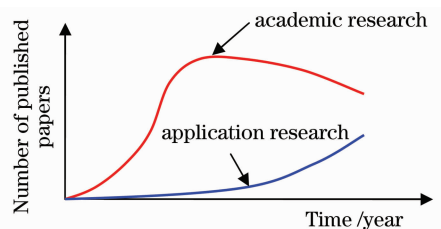


图3 学术研究方向或领域成熟度趋势曲线

Fig. 3 Publication trend line indicating the maturity of research direction or branch

产品开发通常总是滞后于学术研究,学术研究在先,然后是技术发展,最后才是产品开发与完善,这一延迟一般要持续很长的时间,随着科技在全球的快速发展与进步,这样的周期有日益缩短的趋势,对于白光干涉及其应用技术的近期发展而言,这个周期可以估计为5~10年,如图4所示。从产品开发的角度而言,在降低了技术上的风险的同时,也伴随着市场竞争风险的增大。出于拓展产品市场的考虑,商用化产品一方面将进一步寻求其横向交叉应用的新领域,另一方面也不断扩大与拓展技术应用

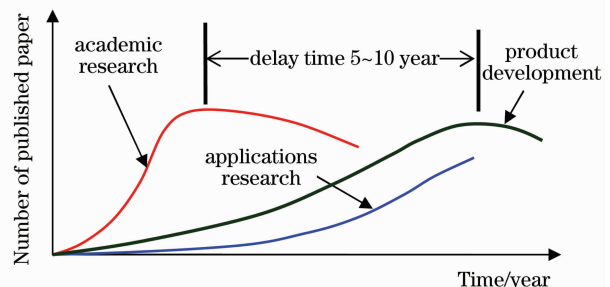


图4 产品研发成熟度趋势曲线

Fig. 4 Products development maturity trend line

可能的范围。随着产品的不断成熟,在市场的推动下,光纤白光干涉技术产品可望引领新一轮的应用创新。

6 结 论

任何一个学术领域的发展方向,都是伴随人们的需求而发生并发展起来的。光纤白光干涉原理与技术就属于这样一个典型的研究领域。可以看到其发源于社会需求,借助于早期相关的光学概念和理论,伴随着技术的不但发展与完善,同时相关的理论也不断得到深化。在这个研究领域中,理论与技术交互发展和相互促进,两者共同推动了该领域的不断发展和进步。

参 考 文 献

- 1 E. Wolf. A macroscopic theory of interference and diffraction of light from finite sources II. Fields with a spectral range of arbitrary width [J]. *Proc. Roy. Soc. London A*, 1955, **230**: 246~265
- 2 A. Blanc-Lapierre, Dumonted. *Rev. Opt.*, 1955, **34**(1): 21
- 3 S. A. Al-Chalabi, B. Chlshaw, D. E. N. David. Partially coherent sources in interferometric sensors [C]. Proc. 1st International Conference on Optical Fiber Sensors, London, 1983. 132~135
- 4 K. Takada, J. Noda, K. Okamoto. Measurement of spatial distribution of mode coupling in birefringent polarization-maintaining fiber with new detection scheme[J]. *Opt. Lett.*, 1986, 1986, **11**(10): 680~682
- 5 R. C. Youngquist, S. Carr, D. E. N. Davies. Optical coherence-domain reflectometry: a new optical evaluation technique[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(3): 158~160
- 6 D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin *et al.*. Optical coherence tomography[J]. *Science*, 1991, **254**:1178~1181
- 7 M. A. Choma, M. V. Sarunic, C. H. Yang *et al.*. Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(18): 2183~2189
- 8 J. F. de Boer, B. Cense, B. H. Park *et al.*. Improved signal-to-noise ratio in spectral-domain compared with time-domain optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(21): 2067~2069
- 9 R. Leitgeb, C. K. Hitzenberger, A. F. Fercher. Performance of Fourier domain versus time domain optical coherence tomography[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(8): 889~894
- 10 M. Wojtkowski, T. Bajraszewski, P. Targowski *et al.*. Real-time in vivo imaging by high-speed spectral optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(19): 1745~1747
- 11 S. H. Yun, G. J. Tearney, B. E. Bouma *et al.*. High-speed spectral-domain optical coherence tomography at 1.3 μm wavelength[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(26): 3598~3604
- 12 S. H. Yun, G. J. Teamey, J. F. de Boer *et al.*. High-speed optical frequency-domain imaging [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(22): 2953~2963
- 13 E. Wolf. Unified theory of coherence and polarization of random electromagnetic beams[J]. *Phys. Lett. A*, 2003, **312**(5-6): 263~267
- 14 P. Réfrégier, A. Roueff. Invariant degrees of coherence of partially polarized light [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16): 6051~6060
- 15 M. Born, E. Wolf. Principle of Optics [M]. 7th ed (Expanded), Cambridge: University Press, 1999
- 16 C. Delisle, P. Cielo. Application de la modulation spectrale a la transmission de l'information [J]. *Canad. J. Phys.*, 1975, **53**(11): 1047~1053
- 17 C. Delisle, P. Cielo. Multiplexing in optical communications by interferometry with a large path-length difference in white light [J]. *Canad. J. Phys.*, 1976, **54**(12): 2322~2331
- 18 T. Bosselmann, R. Ulrich. High-accuracy position-sensing with fiber-coupled white-light interferometers [C]. Proc. 2nd International Conference on Optical Fiber Sensors, 1984. 361~364
- 19 G. Boheim. Fiber-linked interferometric pressure sensor [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1987, **58**(9): 1655~1659
- 20 M. T. Velluet, P. Graindorge, H. J. Arditty. Fiber optic pressure sensor using white-light interferometry [C]. *SPIE*, 1987, **838**, 78~83
- 21 D. Trouchet, B. Laloux, P. Graindorge. Prototype industrial multi-parameter FO sensor using white light interferometry [C]. Proc. 6th International Conference on Optical Fiber Sensors, 1989. 227~233
- 22 G. Boheim. Fiber optic thermometer using semiconductor etalon sensor [J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(5): 238~239
- 23 J. C. Harl, E. W. Saaski, G. L. Mitchell. Fiber optic temperature sensor using spectral modulation [C]. *SPIE*, 1987, **838**: 257~261
- 24 A. D. Kersey, A. Dandridge. Dual-wavelength approach to interferometric sensing [C]. *SPIE*, 1987, **798**, 176~181
- 25 F. Farahi, T. P. Newson, J. D. C. Jones *et al.*. Coherence multiplexing of remote fiber Fabry-Perot sensing system [J]. *Opt. Commun.*, 1988, **65**(5): 319~321
- 26 V. Gusmeroli, P. Vavassori, M. Martinelli. A coherence-multiplexed quasi-distributed polarimetric sensor suitable for structural monitoring [C]. Proc. 6th International Conference on Optical Fiber Sensors, 1989, 513~518
- 27 G. Kotrotsios, Parriaux. White light interferometry for distributed sensing on dual mode fibers monitoring [C]. Proc. 6th International Conference on Optical Fiber Sensors, 1989, 568~574
- 28 K. Takada, I. Yokohama, K. Chida *et al.*. New measurement system for fault location in optical waveguide devices based on an interferometric technique [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(9): 1603~1606
- 29 B. L. Danielson, C. D. Whittenberg. Guided-wave reflectometry with micrometer resolution [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(14): 2836~2842
- 30 J. Ballif, R. Gianotti, R. Walti *et al.*. Rapid and scalable scans at 21 m/s in optical low-coherence reflectometry [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11): 757~759
- 31 F. Lindgren, R. Gianotti, R. Walti *et al.*. -78-dB shot-noise limited optical low-coherence reflectometry at 42-m/s scan speed [J]. *IEEE Photon. Lett.*, 1997, **9**(12): 1613~1615
- 32 J. Szydlo, H. Bleuler, R. Walti *et al.*. High-speed measurements in optical low-coherence reflectometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**(8): 1159~1162
- 33 A. Kock, R. Ulrich. Displacement sensor with electronically scanned white-light interferometer [C]. *SPIE*, 1990, **1267**: 128~133
- 34 S. Chen, B. T. Meggitt, A. J. Rogers. Electronically scanned white-light interferometry with enhanced dynamic range [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(20): 1663~1665
- 35 S. Chen, B. T. Meggitt, A. J. Rogers. An electronically scanned white-light Young's interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(10): 761~763

- 36 S. Chen, A. W. Palmer, K. T. V. Grattan *et al.*. Study of electronically scanned optical fiber Fizeau interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(12): 1032~1034
- 37 S. Chen, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer *et al.*. Digital processing techniques for electronically scanned optical fiber white light interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(28): 6003~0010
- 38 S. Chen, K. T. V. Grattan, B. T. Meggitt *et al.*. Instantaneous fringe-order identification using dual broad source with widely spaced wavelengths [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(4): 334~335
- 39 Y. J. Rao, Y. N. Ning, D. A. Jackson. Synthesized source for white-light sensing systems [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(6): 462~464
- 40 D. N. Wang, Y. N. Ning, K. T. V. Grattan *et al.*. Three-wavelength combination source for white-light interferometry [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(11): 1350~1352
- 41 L. B. Yuan. White light interferometric fiber-optic strain sensor with three-peak-wavelength broadband LED source [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(25): 6246~6250
- 42 Q. Wang, Y. N. Ning, A. W. Palmer *et al.*. Central fringe identification in a white light interferometer using a multi-stage-squaring signal processing scheme [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **117**(3-4): 241~244
- 43 J. L. Brooks, R. H. Wentworth, R. C. Youngquist *et al.*. Coherence multiplexing of fiber-optic interferometric sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(5): 1062~1072
- 44 V. Gsmeroli, P. Vavassori, M. Martinelli. A coherence-multiplexed quasi-distributed polarimetric sensor suitable for structure monitoring [C]. Proc. 6th International Conference on Optical Fiber Sensors, Paris, 1989, 513~518
- 45 C. Lecot, J. J. Guerin, M. Lequime. White light fiber optic sensor network for the thermal monitoring of the stator in a nuclear power plant alternator sensors [C]. Proc. 9th International Conference on Optical Fiber Sensors, Florence, 1993, 271~274
- 46 Y. J. Rao, D. A. Jackson. A prototype multiplexing system for use with a large number of fiber-optic-based extrinsic Fabry-Perot sensors exploiting low coherence interrogation [C]. *SPIE*, 1995, **2507**: 90~98
- 47 W. V. Sorin, D. M. Baney. Multiplexed sensing using optical low-coherence reflectometry [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(8): 917~919
- 48 D. Inaudi, S. Vurpillot, S. Loret. In-line coherence multiplexing of displacement sensors, a fiber optic extensometer [C]. *SPIE*, 1996, **2718**: 251~257
- 49 L. B. Yuan, F. Ansari. White light interferometric fiber optic distribution strain sensing system [J]. *Sensors and Actuators: A. Physical*, 1997, **63**(3): 177~181
- 50 L. B. Yuan, L. M. Zhou. $1 \times N$ star coupler as distributed fiber optic strain sensor using in white light interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(19): 4168~4172
- 51 L. B. Yuan, L. M. Zhou, W. Jin. Quasi-distributed strain sensing with white-light interferometry; a novel approach [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(15): 1074~1076
- 52 D. Inaudi, A. Elamari, L. Pflug *et al.*. Low-coherence deformation sensors for monitoring of civil-engineering structures [J]. *Sensors and Actuators A*, 1994, **44**(2): 125~130
- 53 V. Bhatia, K. A. Murphy, R. O. Claus *et al.*. Optical fiber based absolute extrinsic Fabry-Perot interferometric sensing system [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(1): 58~61
- 54 L. B. Yuan, L. M. Zhou, J. S. Wu. Fiber-optic temperature sensor with duplex michleson interferometric technique [J]. *Sensors and Actuators: A, Physical*, 2000, **86**(1-2): 2~7
- 55 L. B. Yuan, L. M. Zhou, W. Jin. Recent progress of white light interferometric fiber optic strain sensing techniques [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, **71**(12): 4648~4654
- 56 L. B. Yuan, Q. B. Li, Y. J. Liang *et al.*. Fiber optic 2-D strain sensor for concrete specimen [J]. *Sensors and Actuators A*, 2001, **94**(1-2): 25~31
- 57 E. Udd. (ed), *Fiber Optic Smart Structures* [B]. New York: Wiley, 1995
- 58 Zhang Jinghua, Wang Chunhua, Huang Zhaoming. Application of white-light interference in measurement and prinipal axes alignment of polarization-maintaining fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(12): 1308~1311
张靖华, 王春华, 黄肇明. 白光干涉在保偏光纤测量与对轴中的应用 [J]. *光学学报*, 1994, **14**(12): 1308~1311
- 59 Zhang Jinghua, Wang Chunhua. Affect of power spectrum of source on white-light interference measurement [J]. *Optical Technology*, 1997, **33**(5): 30~35
张靖华, 王春华. 光源功率谱对白光干涉测量的影响 [J]. *光学技术*, 1997, **33**(5): 30~35
- 60 Wang Qi, Zhang Zhipeng, Li Yianying. A fiber optic sensing system using dual Fabry-Perot cavities [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Technol.*, 1993, **21**(5): 143~146
王 奇, 张志鹏, 李天应. 用光纤连接的双 F-P 干涉仪传感系统 [J]. *华中理工大学学报*, 1993, **21**(5): 143~146
- 61 Li Xuesong, Liao Yanbiao, Li Tianchu *et al.*. White-light scanning fiber Michelson interferometer [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1996, **17**(4): 241~245
李雪松, 廖延彪, 李天初 等. 白光干涉型 Michelson 光纤扫描干涉仪 [J]. *计量学报*, 1996, **17**(4): 241~245
- 62 Wang Tao, Zhong Kejiang, Ye Wei *et al.*. Interferometric measurement of polarization mode distribution in fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(6): 737~740
王 涛, 周柯江, 叶 炜 等. 光纤偏振态模式分布的干涉测量方法 [J]. *光学学报*, 1997, **17**(6): 737~740
- 63 Zhong Kejiang, Wang Tao. Research on fiber white-light interferometer [J]. *Laser & Infrared*, 1997, **27**(4): 242~244
周柯江, 王 涛. 光纤白光干涉仪的研究 [J]. *激光与红外*, 1997, **27**(4): 242~244
- 64 Li Maohe, Zhang Meidun. Optical path difference measurement of fiber interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(8): 740~743
李毛和, 张美敦. 光纤干涉仪臂差的测量 [J]. *光子学报*, 1999, **28**(8): 740~743
- 65 Li Maohe, Zhang Meidun. Refractive index Measurement by optical fiber michelson interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(16): 1294~1296
李毛和, 张美敦. 用光纤迈克尔逊干涉仪测量折射率 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(16): 1294~1296
- 66 Li Li, Wang Chunhua, Huang Zhaoming. All fiber sensor by weak-coherence [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(9): 1265~1269
李 力, 王春华, 黄肇明. 全光纤低相干光纤位移传感技术 [J]. *光学学报*, 1997, **17**(2): 1265~1269
- 67 Yuan Libo. Effect of temperature and strain on fiber optic refractive index [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1714~1717
苑立波. 温度和应变对光纤折射率的影响 [J]. *光学学报*, 1997, **17**(12): 1714~1717
- 68 Zhang Zhiyao, Zhou Xiaojun. Experimental study on white light inferential distributed fiber optic press sensor by multi-points pressed [J]. *J. China Academy of Electronics and Information Technology*, 2006, **1**(4): 364~368
张旨遥, 周晓军. 白光干涉分布式光纤压力传感器实验研究 [J]. *中国电子科学研究院学报*, 2006, **1**(4): 364~368
- 69 Zhang Yimo, Jing Wencai, Zhang Hongxia *et al.*. Computerized

- white light scanning interferometer and the application [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2004, **12**(6): 560~565
- 张以谟, 井文才, 张红霞等. 数字化白光扫描干涉仪的研究[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(6): 560~565
- 70 Jing Wencai, Li Qiang, Ren Li *et al.*. Application of wavelet transform in the data processing of white-light interferometry [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(2): 195~198
- 井文才, 李 强, 任 莉等. 小波变换在白光干涉数据处理中的应用[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(2): 195~198
- 71 Zhang Hongxia, Zhang Yimo, Jing Wencai *et al.*. White light interference envelope extract in polarization coupling analyzer [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(4): 450~453
- 张红霞, 张以谟, 井文才等. 偏振耦合测试仪中白光干涉包络的提取[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(4): 450~453
- 72 Tang Feng, Wang Xiangzhao, Zhang Yimo *et al.*. Distributed measurement of birefringence dispersion in polarization-maintaining fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(23): 3411~3413
- 73 Tang Feng, Wang Xiang-zhao, Zhang Yi-mo *et al.*. Characterization of birefringence dispersion in polarization-maintaining fibers by use of white-light interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(19): 4073~4080
- 74 Meng Zhuo, X. Steve Yao, Yao Hui *et al.*. Measurement of the refractive index of human teeth by optical coherence tomography [J]. *J. Biomed. Opt.*, 2009, **14**(3): 034010
- 75 Meng Zhuo, Yao Xiaotian, Lan Shoufeng *et al.*. Study of automatic elimination of polarization fluctuation method for all-fiber oral OCT system [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(1): 133~136
- 孟 卓, 姚晓天, 兰寿锋等. 全光纤口腔 OCT 系统偏振波动自动消除方法研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(1): 133~136
- 76 Yun-Jiang Rao, David A. Jackson. Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**: 981~999
- 77 Jing Zhenguo, Yu Qingxu, Zhang Guiju *et al.*. A novel wavelength demodulating method for white light optical fiber sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1347~1351
- 荆振国, 于清旭, 张桂菊等. 一种新的白光光纤传感系统波长解调方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1347~1351
- 78 Jing Zhenguo. Study on White Light Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Optical Fiber Sensor and its Applications [D]. Dalian University of Technology, 2006
- 荆振国. 白光非本征法布里-珀罗干涉光纤传感器及其应用研究 [D]. 大连理工大学博士论文, 2006
- 79 Yi Jiang. Wavelength scanning white-light interferometry with a 3×3 coupler based interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(16): 1869~1871
- 80 Yi Jiang. Fourier transform white-light interferometry for the measurement of fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **30**(2): 75~77
- 81 Y. Jiang, C. J. Tang. Fourier transform white-light interferometry based spatial frequency division multiplexing of extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, **79**(10): 106105
- 82 Zhou Xiaojun, Gong Junjie, Liu Yongzhi *et al.*. Analysis of white-light interference distributed optic fiber sensor by polarized modes coupling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 605~608
- 周晓军, 龚俊杰, 刘永智等. 白光干涉偏振模耦合分布式光纤传感器分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 605~608
- 83 Zhou Xiaojun, Du Dong, Gong Junjie. Study on spatial resolution of polarized-modes coupling distributed fiber optic sensor [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(5): 2106~2110
- 周晓军, 杜 东, 龚俊杰. 偏振模耦合分布式光纤传感器空间分辨率研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(5): 2106~2110
- 84 Yuan Libo, Zhou Limin, Jin Wei *et al.*. Low-coherence fiber optic sensors ring-network based on a Mach-Zehnder interrogator [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(11): 894~896
- 85 Yuan Libo, Yang Jun. Schemes of 3×3 star coupler based fiber-optic multiplexing sensors array [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(9): 961~963
- 86 Yuan Libo, Yang Jun. Two-loop based low-coherence multiplexing fiber optic sensors network with Michelson optical path demodulator [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(6): 601~603
- 87 Yang Jun, Yuan Libo. Theoretical and experimental study on white-light interferometric sensing network with double-ring topology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 731~736
- 杨 军, 苑立波. 白光干涉双环传感网络理论与实验研究 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 731~736
- 88 Yang Jun, Yuan Libo. Configuration of fiber optic sensor network with an embedded-loop topology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1391~1396
- 杨 军, 苑立波. 具有嵌入式环形拓扑结构的光纤传感器网络 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1391~1396
- 89 L. B. Yuan, W. Jin, L. M. Zhou *et al.*. The temperature characteristic of fiber-optic per-embedded concrete bar sensor [J]. *Sensors and Actuators A*, 2001, **93**(3): 206~213
- 90 Yuan Libo, Yang Jun. Fiber Optic White Light Interferometric Sensing Technology [M]. Beijing: Beihang University Press, 2001
- 苑立波, 杨 军. 光纤白光干涉传感技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001
- 91 W. V. Sorin, D. M. Baney. A simple intensity noise reduction technique for optical low-coherence reflectometry [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(12): 1404~1406
- 92 D. M. Baney, W. V. Sorin. Extended-range optical low-coherence reflectometry using a recirculating delay technique [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(9): 1109~1112
- 93 D. M. Baney, W. V. Sorin. Optical low coherence reflectometry with range extension >150 m [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(20): 1775~1776
- 94 G. J. Tearney, M. E. Brezinski, B. E. Bouma *et al.*. In vivo endoscopic optical biopsy with optical coherence tomography [J]. *Science*, 1997, **276**(5321): 2037~2039
- 95 J. G. Fujimoto, M. E. Brezinski, G. J. Tearney *et al.*. Optical biopsy and imaging using optical coherence tomography [J]. *Nature Medicine*, 1995, **1**(9): 970~972
- 96 M. R. Hee, C. A. Puliafito, C. Wong *et al.*. Optical coherence tomography of macular holes [J]. *Ophthalmology*, 1995, **102**(5): 748~756
- 97 M. R. Hee, C. R. Baumal, C. A. Puliafito *et al.*. Optical coherence tomography of age-related macular degeneration and choroidal neovascularization [J]. *Ophthalmology*, 1996, **103**(8): 1260~1270
- 98 M. E. Brezinski, G. J. Tearney, N. J. Weissman *et al.*. Assessing atherosclerotic plaque morphology: comparison of optical coherence tomography and high frequency intravascular ultrasound [J]. *Heart*, 1997, **77**(5): 397~403
- 99 G. J. Tearney, M. E. Brezinski, J. F. Southern *et al.*. Optical biopsy in human gastrointestinal tissue using optical coherence tomography [J]. *American J. Gastroenterology*, 1997, **92**(10): 1800~1804
- 100 G. J. Tearney, M. E. Brezinski, J. F. Southern *et al.*. Optical biopsy in human urologic tissue using optical coherence tomography [J]. *J. Urology*, 1997, **157**(5): 1915~1919
- 101 F. I. Feldchtein, G. V. Gelikonov, V. M. Gelikonov *et al.*. Endoscopic applications of optical coherence tomography [J]. *Opt. Express*, 1998, **3**(6): 257~270
- 102 M. R. Hee, C. A. Puliafito, J. S. Duker *et al.*. Topography

- of diabetic macular edema with optical coherence tomography [J]. *Ophthalmology*, 1998, **105**(2): 360~370
- 103 J. G. Fujimoto, S. A. Boppart, G. J. Tearney *et al.*. High resolution in vivo intra-arterial imaging with optical coherence tomography[J]. *Heart*, 1999, **82**(2): 128~133
- 104 X. D. Li, S. A. Boppart, J. Van Dam *et al.*. Optical coherence tomography; advanced technology for the endoscopic imaging of Barren's esophagus[J]. *Endoscopy*, 2000, **32**(12): 921~930
- 105 S. A. Boppart, W. Luo, D. L. Marks *et al.*. Optical coherence tomography; feasibility for basic research and image-guided surgery of breast cancer [J]. *Breast Cancer Research and Treatment*, 2004, **84**(2): 85~97
- 106 T. Kubota, M. Nara, T. Yoshino. Interferometer for measuring displacement and distance[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(5): 310~312
- 107 K. Takada, I. Yokohama, K. Chida *et al.*. New measurement system for fault location in optical waveguide devices based on an interferometric-technique [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(9): 1603~1606
- 108 H. H. Gilgen, R. P. Novak, R. P. Salathe *et al.*. Submillimeter optical reflectometry [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(8): 1225~1233
- 109 K. Takada, K. Yukimatsu, M. Kobayashi *et al.*. Rayleigh backscattering measurement of single-mode fibers by low coherence optical time-domain reflectometer with 14 μm spatial resolution[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(2): 143~145
- 110 A. F. Fercher, K. Mengedoht, W. Wemer. Eye-length measurement by interferometry with partially coherent light[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(3): 186~188
- 111 J. G. Fujimoto, S. Desilvestri, E. P. Ippen *et al.*. Femtosecond optical ranging in biological systems [J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(3): 150~152
- 112 A. F. Fercher, C. K. Hitzenberger, W. Drexler *et al.*. In-vivo optical coherence tomography[J]. *Amer. J. Ophthalmology*, 1993, **116**(1): 113~115
- 113 E. A. Swanson, J. A. Izatt, M. R. Hee *et al.*. In vivo retinal imaging by optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(21): 1864~1866
- 114 B. E. Applegate, C. H. Yang, A. M. Rollins *et al.*. Polarization-resolved second-harmonic generation optical coherence tomography in collagen[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(19): 2252~2254
- 115 J. F. de Boer, T. E. Milner, M. J. C. van Gemert *et al.*. Two-dimensional birefringence imaging in biological tissue by polarization-sensitive optical coherence tomography [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(12): 934~936
- 116 M. R. Hee, D. Huang, E. A. Swanson *et al.*. Polarization-sensitive low-coherence reflectometer for birefringence characterization and ranging[J]. *J. Opt. Soc. Am. B-Optical Physics*, 1992, **9**(6): 903~908
- 117 J. A. Izatt, M. D. Kulkarni, S. Yazdanfar *et al.*. In vivo bidirectional color Doppler flow imaging of picoliter blood volumes using optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(18): 1439~1441
- 118 Y. Jiang, I. Tomov, Y. M. Wang *et al.*. Second-harmonic optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(10): 1090~1092
- 119 R. Leitgeb, M. Wojtkowski, A. Kowalczyk *et al.*. Spectral measurement of absorption by spectroscopic frequency-domain optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11): 820~822
- 120 U. Morgner, W. Drexler, R. X. Kartner *et al.*. Spectroscopic optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(2): 111~113
- 121 A. L. Oldenburg, J. R. Gunther, S. A. Boppart. Imaging magnetically labeled cells with magnetomotive optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 747~749
- 122 A. L. Oldenburg, F. J. J. Toublan, K. S. Suslick *et al.*. Magnetomotive contrast for in vivo optical coherence tomography[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(17): 6597~6614
- 123 C. E. Saxer, J. F. de Boer, B. H. Park *et al.*. High-speed fiber-based polarization-sensitive optical coherence tomography of in vivo human skin[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18): 1355~1357
- 124 C. Y. Xu, J. Ye, D. L. Marks *et al.*. Near-infrared dyes as contrast-enhancing agents for spectroscopic optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(14): 1647~1649
- 125 Y. H. Zhao, Z. P. Chen, C. Saxer *et al.*. Phase-resolved optical coherence tomography and optical doppler tomography for imaging blood flow in human skin with fast scanning speed and high velocity sensitivity[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(2): 114~116
- 126 M. A. Choma, M. V. Sarunic, C. H. Yang *et al.*. Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(18): 2183~2189
- 127 J. F. de Boer, B. Cense, B. H. Park *et al.*. Improved signal-to-noise ratio in spectral-domain compared with time-domain optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(21): 2067~2069
- 128 R. Leitgeb, C. K. Hitzenberger, A. F. Fercher. Performance of Fourier domain versus time domain optical coherence tomography[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(8): 889~894
- 129 M. Wojtkowski, T. Bajraszewski, P. Targowski *et al.*. Real-time in vivo imaging by high-speed spectral optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(19): 1745~1747
- 130 S. H. Yun, G. J. Tearney, B. E. Bouma *et al.*. High-speed spectral-domain optical coherence tomography at 1.3 μm wavelength[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(26): 3598~3604
- 131 D. C. Lee, J. Xu, M. V. Sarunic *et al.*. Fourier domain optical coherence tomography as a noninvasive means for *in vivo* detection of retinal degeneration in xenopus leavis tadpoles[J]. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 2010, **51**(2): 1066~1070
- 132 D. C. Adler, Y. Chen, R. Huber *et al.*. Three-dimensional endomicroscopy using optical coherence tomography [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(12): 709~716
- 133 R. Huber, D. C. Adler, J. G. Fujimoto. Buffered Fourier domain mode locking; unidirectional swept laser sources for optical coherence tomography imaging at 370,000 lines/s[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(20): 2975~2977
- 134 R. Huber, M. Wojtkowski, J. G. Fujimoto. Fourier domain mode locking (FDML): a new laser operating regime and applications for optical coherence tomography [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8): 3225~3237
- 135 S. H. Yun, G. J. Tearney, B. J. Vakoc *et al.*. Comprehensive volumetric optical microscopy in vivo [J]. *Nature Medicine*, 2006, **12**: 1429~1433
- 136 A. M. Zysk, F. T. Nguyen, A. L. Oldenburg *et al.*. Optical coherence tomography: a review of clinical development from bench to bedside[J]. *J. Biomed. Opt.*, 2007, **12**(5): 051403
- 137 V. Guedes, J. S. Schuman, E. Hertzmark *et al.*. Optical coherence tomography measurement of macular and nerve fiber layer thickness in normal and glaucomatous human eyes[J]. *Ophthalmology*, 2003, **110**(1): 177~189
- 138 M. Hangai, Y. Jima, N. Gotoh *et al.*. Three-dimensional imaging of macular holes with high-speed optical coherence tomography[J]. *Ophthalmology*, 2007, **114**(4): 763~773
- 139 T. H. Ko, J. G. Fujimoto, J. S. Duker *et al.*. Comparison of ultrahigh- and standard-resolution optical coherence tomography for imaging macular hole pathology and repair [J]. *Ophthalmology*, 2004, **111**(11): 2033~2043

- 140 V. J. Srinivasan, M. Wojtkowski, A. J. Witkin *et al.*. High-definition and 3-dimensional imaging of macular pathologies with high-speed ultrahigh-resolution optical coherence tomography [J]. *Ophthalmology*, 2006, **113**(11): 2054~2065
- 141 B. E. Bouma, G. J. Tearney, H. Yabushita *et al.*. Evaluation of intracoronary stenting by intravascular optical coherence tomography[J]. *Heart*, 2003, **89**(3): 317~320
- 142 A. Erglis, S. Jegere, K. Trusinskis *et al.*. Stent endothelialization after paclitaxel eluting stent implantation in left main; A3 year intravascular ultrasound and optical coherence tomography follow-up[J]. *Amer. J. Cardiology*, 2009, **104**(6): 13D
- 143 E. Grube, U. Gerckens, L. Buellesfeld *et al.*. Intracoronary imaging with optical coherence tomography-a new high-resolution technology providing striking visualization in the coronary artery[J]. *Circulation*, 2002, **106**: 2409~2410
- 144 K. Ishibashi, H. Kitabata, T. Akasaka. Intracoronary optical coherence tomography assessment of spontaneous coronary artery dissection[J]. *Heart*, 2009, **95**: 818
- 145 I. K. Jang, B. E. Bouma, D. H. Kang *et al.*. Visualization of coronary atherosclerotic plaques in patients using optical coherence tomography: comparison with intravascular ultrasound[J]. *J. Am. College of Cardiology*, 2002, **39**: 604~609
- 146 O. Manfrini, N. J. Miele, B. h. Sharaf *et al.*. Qualitative results of intracoronary imaging during balloon inflation with optical coherence tomography in humans[J]. *J. Am. College of Cardiology*, 2003, **41**(6): 60A
- 147 Y. Ozaki, M. Okumura, J. Ishii *et al.*. Vulnerable lesion characteristics assessed by optical coherence tomography (OCT), intracoronary ultrasound (IVUS), angiography and quantitative coronary angiography (QCA)[J]. *J. Am. College of Cardiology*, 2006, **47**(4): 53B
- 148 N. Rosenthal, G. Guagliumi, V. Sirbu *et al.*. Comparison of intravascular ultrasound and optical coherence tomography for the evaluation of stent segment malapposition [J]. *J. Am. College of Cardiology*, 2009, **53**(10): A22
- 149 T. Yamaguchi, M. Terashima, T. Akasaka *et al.*. Safety and feasibility of an intravascular optical coherence tomography image wire system in the clinical setting [J]. *Am. J. Cardiology*, 2008, **101**(5): 562~567
- 150 W. B. Armstrong, J. M. Ridgway, D. E. Vokes *et al.*. Optical coherence tomography of laryngeal cancer [J]. *Laryngoscope*, 2006, **116**(7): 1107~1113
- 151 P. F. Escobar, J. L. Belinson, A. White *et al.*. Diagnostic efficacy of optical coherence tomography in the management of preinvasive and invasive cancer of uterine cervix and vulva[J]. *Inte. J. Gynecological Cancer*, 2004, **14**: 470~474
- 152 L. P. Hariri, A. R. Tumlinson, D. G. Besselsen *et al.*. Endoscopic optical coherence tomography and laser-induced fluorescence spectroscopy in a murine colon cancer model[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2006, **38**(4): 305~313
- 153 Y. T. Pan, T. Q. Xie, C. W. Du *et al.*. Enhancing early bladder cancer detection with fluorescence-guided endoscopic optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(24): 2485~2487
- 154 B. E. Bouma, G. J. Tearney. Handbook of Optical Coherence Tomography[M]. New York; Marcel Dekker, 2002
- 155 B. E. Bouma, G. J. Tearney. Clinical imaging with optical coherence tomography[J]. *Academic Radiology*, 2002, **9**(8): 942~953
- 156 W. Drexler, J. G. Fujimoto. Optical Coherence Tomography-Technology and Applications[M]. New York; Springer-Verlag, 2008
- 157 A. F. Fercher, W. Drexler, C. K. Hitzenberger *et al.*. Optical coherence tomography-principles and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2003, **66**: 239~303
- 158 J. G. Fujimoto, C. Pitris, S. A. Boppart *et al.*. Optical coherence tomography: an emerging technology for biomedical imaging and optical biopsy[J]. *Neoplasia*, 2000, **2**(1-2): 9~25
- 159 J. M. Schmitt. Optical coherence tomography (OCT): a review [J]. *IEEE J. Sel. Topics in Quant. Electron.*, 1999, **5**(4): 1205~1215
- 160 P. H. Tomlins, R. K. Wang. Theory, developments and applications of optical coherence tomography [J]. *J. Phys. D-Appl. Phys.*, 2005, **38**: 2519~2535
- 161 K. Bogunia-Kubik, M. Sugisaka. From molecular biology to nanotechnology and nanomedicine[J]. *Biosystems*, 2002, **65**(2-3): 123~138
- 162 O. C. Farokhzad, R. Langer. Nanomedicine: developing smarter therapeutic and diagnostic modalities [J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2006, **58**(14): 1456~1459
- 163 K. K. Jain. Nanomedicine: application of nanobiotechnology in medical practice[J]. *Medical Principles and Practice*, 2008, **17**(2): 89~101
- 164 G. M. Lanza, P. M. Winter, S. D. Caruthers *et al.*. Nanomedicine opportunities for cardiovascular disease with perfluorocarbon nanoparticles[J]. *Nanomedicine*, 2006, **1**(3): 321~329
- 165 K. C. P Li, S. D. Pandit, S. Guccione *et al.*. Molecular imaging applications in nanomedicine [J]. *Biomedical Microdevices*, 2004, **6**(2): 113~116
- 166 Y. F. Liu, H. F. Wang. Nanomedicine nanotechnology tackles tumours[J]. *Nature Nanotechnology*, 2007, **2**: 20~21
- 167 Y. Y. Liu, H. Miyoshi, M. Nakamura. Nanomedicine for drug delivery and imaging: a promising avenue for cancer therapy and diagnosis using targeted functional nanoparticles [J]. *Inte. J. Cancer*, 2007, **120**(12): 2527~2537
- 168 S. M. Moghimi, A. C. Hunter, J. C. Murray. Nanomedicine: current status and future prospects [J]. *FASEB J.*, 2005, **19**(3): 311~330
- 169 V. Wagner, A. Dullaart, A. K. Bock *et al.*. The emerging nanomedicine landscape [J]. *Nature Biotechnology*, 2006, **24**(10): 1211~1217
- 170 P. Gould. Multitasking nanoparticles target cancer-nanomedicine[J]. *Nano Today*, 2008, **3**(1-2): 9
- 171 P. Hervella, V. Lozano, M. Garcia-Fuentes. Nanomedicine: new challenges and opportunities in cancer therapy [J]. *J. Biomedical Nanotechnology*, 2008, **4**(3): 276~292
- 172 D. K. Kim, J. Dobson. Nanomedicine for targeted drug delivery[J]. *J. Materials Chemistry*, 2009, **19**(35): 6294~6307
- 173 C. Shaffer. Nanomedicine transforms drug delivery[J]. *Drug Discovery Today*, 2005, **10**(23-24): 1581~1582
- 174 B. Sumer, J. M. Gao. Theranostic nanomedicine for cancer [J]. *Nanomedicine*, 2008, **3**(2): 137~140
- 175 R. J. Zemp. Nanomedicine detecting rare cancer cells [J]. *Nature Nanotechnology*, 2009, **4**(12): 798~799
- 176 W. Drexler. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography [J]. *J. Biomed. Opt.*, 2004, **9**(1): 47~74
- 177 W. Drexler, U. Morgner, F. X. Kartner *et al.*. In vivo ultrahigh-resolution optical coherence tomography [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(17): 1221~1223
- 178 I. Hartl, X. D. Li, C. Chudoba *et al.*. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(9): 608~610
- 179 B. Povazay, K. Bizheva, A. Unterhuber *et al.*. Submicrometer axial resolution optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(20): 1800~1802

- 180 T. S. Ralston, D. L. Marks, P. S. Carney *et al.*. Interferometric synthetic aperture microscopy [J]. *Nature Physics*, 2007, **3**: 129~134
- 181 T. S. Ralston, D. L. Marks, P. S. Carney *et al.*. Real-time interferometric synthetic aperture microscopy [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(4): 2555~2569
- 182 M. A. Choma, A. K. Ellerbee, C. H. Yang *et al.*. Spectral-domain phase microscopy [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(10): 1162~1164
- 183 A. K. Ellerbee, T. L. Creazzo, J. A. Izatt. Investigating nanoscale cellular dynamics with cross-sectional spectral-domain phase microscopy[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 8115~8124
- 184 C. Joo, T. Akkin, B. Cense *et al.*. Spectral-domain optical coherence phase microscopy for quantitative phase-contrast imaging[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(16): 2131~2133
- 185 E. J. McDowell, A. K. Ellerbee, M. A. Choma *et al.*. Spectral-domain phase microscopy for local measurements of cytoskeletal rheology in single cells[J]. *J. Biomed. Opt.*, 2007, **12**(4): 044008
- 186 D. C. Adler, T. H. Ko, P. R. Herz *et al.*. Optical coherence tomography contrast enhancement using spectroscopic analysis with spectral autocorrelation[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(22): 5487~5501
- 187 H. Cang, T. Sun, Z. Y. Li *et al.*. Gold nanocages as contrast agents for spectroscopic optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(22): 3048~3050
- 188 A. L. Oldenburg, C. Y. Xu, S. A. Boppart. Spectroscopic optical coherence tomography and microscopy[J]. *IEEE J. Sel. Topics in Quant. Electron.*, 2007, **13**(6): 1629~1640
- 189 C. Y. Xu, P. S. Carney, S. A. Boppart. Wavelength-dependent scattering in spectroscopic optical coherence tomography[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(14): 5450~5462
- 190 J. J. Pasquesi, S. C. Schlachter, M. D. Boppart *et al.*. In vivo detection of exercise-induced ultrastructural changes in genetically altered murine skeletal muscle using polarization-sensitive optical coherence tomography [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(4): 1547~1556
- 191 D. L. Marks, S. A. Boppart. Nonlinear interferometric vibrational imaging [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(12): 123905
- 192 Daniele Inaudi, Nicoletta Casanova. SMARTEC: bringing fiber optic sensors into concrete applications[C]. 15th Optical Fiber Sensor Conference, 6-10. 5. 2002, Portland USA
- 193 Y. B. Yuan, L. M. Zhou, W. Jin *et al.*. Low-coherence fiber-optic sensor ring network based on a Mach-Zehnder interrogator [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(11): 894~896
- 194 L. B. Yuan, L. M. Zhou, W. Jin *et al.*. Enhanced multiplexing capacity of low-coherence reflectometric sensors with a loop topology[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8): 1157~1159
- 195 L. B. Yuan, L. M. Zhou, W. Jin. Enhancement of multiplexing capability of low-coherence interferometric fiber sensor array by use of a loop topology[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(5): 1313~1319
- 196 L. B. Yuan, J. Yang. Two-loop based low-coherence multiplexing fiber optic sensors network with Michelson optical path demodulator[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(5): 601~603
- 197 L. B. Yuan, L. M. Zhou, W. Jin. Design of a fiber-optic quasi-distributed strain sensors ring network based on a white-light interferometric multiplexing technique[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(34): 7205~7211
- 198 L. B. Yuan. Modified Michelson fiber-optic interferometer: a remote low-coherence distributed strain sensor array[J]. *Review of Scientific Instrumentation*, 2003, **74**(1): 270~272
- 199 L. B. Yuan, J. Yang, L. M. Zhou *et al.*. Low-coherence michelson interferometric fiber-optic multiplexed strain sensor array: a minimum configuration [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(16): 3211~3215
- 200 L. B. Yuan, J. Yang. Schemes of fiber-optic multiplexing sensors array based on a 3×3 star coupler [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(9): 961~963
- 201 L. B. Yuan, J. Yang. Two-loop based low-coherence multiplexing fiber optic sensors network with Michelson optical path demodulator[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(5): 601~603
- 202 L. B. Yuan, J. Yang. Fiber-optic low-coherence quasi-distributed strain sensing system with multi-configurations[J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, **18**(9): 2931~2937
- 203 L. B. Yuan, Y. T. Dong. Multiplexed fiber optic twin-sensors array based on combination of a Mach-Zehnder and a Michelson interferometer [J]. *J. Intelligent Materials System and Structures*, 2009, **20**(7): 809~813
- 204 L. B. Yuan, J. Yang. A tunable Fabry-Perot resonator based fiber-optic white light interferometric sensor array [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(15): 1780~1782
- 205 Y. G. Yuan, B. Wu, J. Yang *et al.*. Tunable optical path correlator for distributed strain or temperature sensing application[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(20): 3357~3359